مقایسه جفت‌شدگی پرتو-میکرومشدد در ساختارهای توری-جانبی و توری-انتها به منظور کنترل مدهای خاص میکرومشدد

حمید نادگران[۱]، سعید اوشنی[۱]، راحله پورمند[۲]

[۱] بخش فیزیک دانشگاه شیراز
[۲] مرکز آموزش عالی دولتی استهبان

چکیده – در این کار برای اولین بار برانگیختگی مرتبه‌های مختلف مدهای *WGM* یک میکرومشدد در ساختاری که توری پراش بر جداره فیبر نوری حک شده است، انجام گردیده است. نتایج این کار با ساختاری که توری در انتهای فیبر تعبیه گردیده، مقایسه شده است. این نتایج که با استفاده از شرط دقیق تطابق فازی برای جفت‌شدگی پرتو از فیبر به داخل میکرومشدد به دست آمده است، نشان می‌دهد که فاکتور کیفیت برای سامانه توری-جانبی $۱/۰۳ \times ۱۰^{۴}$ و برای سامانه توری-انتها $۱/۷ \times ۱۰^{۴}$ است. نکته قابل توجه آن است که در حالت توری-جانبی، مدهای خاص، قابل کنترل برای برانگیختگی هستند ولی در ساختار توری-انتها این مدها به آسانی قابلیت کنترل ندارند، زیرا در این ساختار پراش و انعکاس از روی خود توری کنترل برانگیختگی مدهای *WGM* را به نحو قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. از آنجا که در بعضی از کاربردهای فوتونیک برانگیختگی مدهای خاص لازم است، سامانه توری-جانبی نسبت به توری-انتها ارجحیت دارد.

کلید واژه- جفت‌شدگی، WGM، توری-جانبی، توری-انتها

Comparison of light-microresonator coupling in both side-grating and end-grating structures to control the excitation of higher radial order WGMs

H. Nadgaran[1], S. Owshani[1], R. Pourmand[2]

[1] Physics Dep. Shiraz University, Shiraz 71454, Iran

[2] Physics Dep. Estahban Higher Education Center, Estahban, Iran

Abstract- In this work for the first time excitation of higher radial order WGMs has been investigated using a metallic grating coupler located on the side of optical fiber (side-grating). The results have been compared with another structure in which grating is put on the end of fiber (end-grating). The results which is understood by phase-matching conditions, show that Q-factor in both side-grating and end-grating is 1.03×10^4 and 1.7×10^4 respectively. The noticeable point is that excitation of a specific radial mode is controllable in side-grating structure while it can't be controlled easily in end-grating structure. The reason stems from the fact that in end-grating structure, light diffraction and reflection from end-grating itself remarkably reduce the excitation control of WGMs. Since some photonic applications require a particular mode to be excited, the side-grating structure is more preferable than the end-grating structure.

Keywords: coupling, WGM, side-grating, end-grating .

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01]

۱- مقدمه

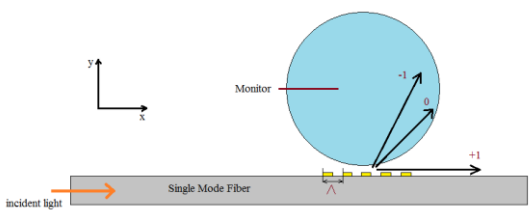
میکرومشددهای پرکیفیت WGM، با طول عمر کاواک طولانی و نیز حجم مدی کوچک به طور قابل توجهی برهمکنش‌های بین نور و ماده را افزایش داده و به طور گسترده‌ای مطالعات بنیادین و کاربردهای عملی در حوزه اپتیک و فوتونیک را تحت‌الشعاع قرار داده است [۱].

فاکتور کیفیت Q بسیار بالای مشددهای WGM باعث حصول چگالی انرژی فوق‌العاده و خطوط تشدید خیلی باریک می‌شود. چنین ویژگی‌هایی است که این ساختار را برای میکرولیزرها [۲, ۳]، الکترودینامیک، اپتیک کوانتومی [۴, ۵] و انواع حسگرها [۵, ۶] بسیار کارآمد کرده است.

تقویت مدهای شعاعی مرتبه‌های بالاتر با توجه به نوع کاربرد اهمیت پیدا می‌کند. در فیلتراسیون و بسیاری از کاربردهای غیرخطی که در آن رقابت مد، یک توان تشدید بیشینه را می‌طلبد، اصولا به یک طیف خالص و بدون مدهای مرتبه‌های بالاتر نیاز است. ولی در آزمایش‌های بیوحسگری شیمیایی که روی میکروشاره‌های محصور در مویرگ انجام می‌پذیرد، برای حساسیت بالاتر کارآمد بودن مرتبه‌های شعاعی بالا در WGM اجتناب‌ناپذیر است [۷].

۲- اصول کار

همان طور که از شکل (۱) مشخص است، در این کار، ساختار شامل یک توری پراش فلزی (طلا) می‌باشد که بر جداره فیبر نوری تک‌مد قرار داده شده است. میکرومشدد نیز بالای توری جای گرفته است. فیبر برای جفت‌شدگی جانبی پرتو و میکروکره باید کمی نازک شود. از بین مرتبه‌های مختلف پراش، مرتبه صفرم و مرتبه ۱- تنها به داخل میکرومشدد افکنده می‌شوند، که فقط مرتبه ۱- پراش با مدهای شعاعی میکرومشدد جفت می‌گردد. این جفت‌شدگی در جهت خلاف عقربه‌های ساعت خواهد بود.

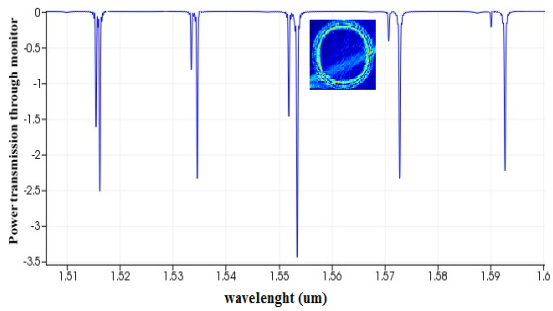


شکل ۱: نمایش دوبعدی جفت‌شدگی نور در حالت توری-جانبی

از آنجا که مدهای اساسی میکروکره در راستای استوای آن جفت می‌شوند، برای محاسبات سریعتر، شبیه‌سازی در دو بعد انجام گرفته است، بدین معنا که از تقریب میکرودیسک به جای میکروکره استفاده شد و شعاع میکرودیسک (سیلیکا) ۱۵ میکرومتر انتخاب گردید. ناظری که نزدیک سطح میکرودیسک واقع شده، یک ناظر خطی است، که توان عبوری (متناسب با شدت عبوری) را بر حسب طول موج اندازه‌گیری می‌کند.

در شکل ۲ برانگیختگی دو مرتبه از مدهای شعاعی تشدید WGM مشاهده می‌شود. این مرتبه‌ها با مرتبه ۱- پراش جفت شده‌اند و در جهت پادساعتگرد درون میکرودیسک انتشار یافته‌اند. منفی بودن پیک‌های منحنی بیانگر جهت انتشار نور جفت‌شده به درون میکرودیسک (پادساعتگرد) است.

دوره توری برابر با ۱/۲ میکرومتر و ضخامت آن ۱۰۰ نانومتر می‌باشد. گاف هوا بین توری و میکرودیسک در حالت بهینه خود (جفت‌شدگی بحرانی) ۳۵۰ نانومتر انتخاب شده است. در این کار از چشمه گوسی با قطبش TE استفاده گردیده است.



شکل ۲: نمودار توان عبوری از مانیتور تعبیه شده نزدیک سطح میکرودیسک بر حسب طول موج در حالت توری-جانبی

احتمال اینکه یکی از مدهای شعاعی میکرودیسک (q=1,2,...) با مرتبه خاصی از پراش جفت شود با شرط تطابق فازی تعیین می‌گردد [۷]. این شرط را از روی انطباق مقدار عددی ضریب مؤثر مد بررسی می‌کنند. نمودار ضریب مؤثر مد WGM (n_{WGM}) در مرجع [۸] محاسبه شده است؛ از طرفی مؤلفه عمودی ضریب مؤثر مرتبه‌های پراش از طریق رابطه زیر به دست می‌آید؛

$$n_k = \left| n_i \sin\theta - k\frac{\lambda}{\Lambda} \right| \qquad (۱)$$

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

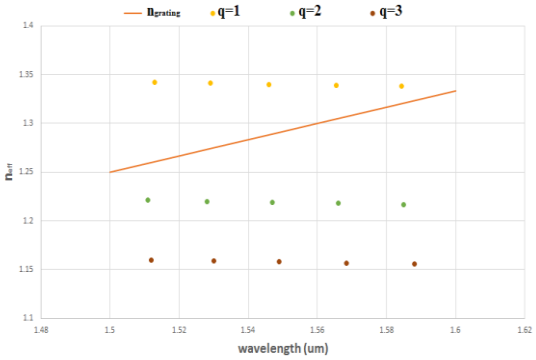
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01]

که در این رابطه n_i ضریب شکست محیط فرودی، θ زاویه فرودی، k مرتبه پراش، λ طول موج و Λ دوره توری پراش می‌باشد.

با به کارگیری رابطه (۱) برای این ساختار، با تقریب خوبی می‌توان زاویه فرودی را صفر در نظر گرفت، زیرا برخورد میدان ناپایا به توری تقریبا به طور عمودی اتفاق می‌افتد. پس معادله (۱) به صورت زیر خواهد بود؛

$$n_k = \frac{\lambda}{\Lambda} \qquad (۲)$$

در شکل ۳ نحوه تطابق فازی مدهای شعاعی WGM و مرتبه منفی پراش، با توجه به n_{eff} نمایش داده شده است.

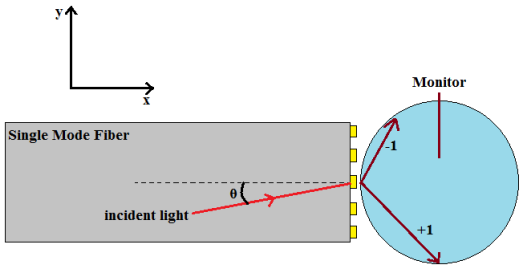


شکل ۳: نمودار ضرایب مؤثر مد محاسبه شده برای ساختار WGM در طول موج‌های تشدید و ضریب مؤثر مرتبه ۱- پراش

همان طور که از شکل ۳ مشخص است، با نزدیک شدن به طول موج‌های بلندتر، تطابق فازی با مرتبه دوم شعاعی شدیدا کاهش می‌یابد که کاملا با نتایج شکل ۲ سازگار است. با تغییر دادن دوره توری، می‌توان منحنی n_k را تغییر داد، بدین معنی که با این کار جفت‌شدگی هر کدام از مدهای مرتبه اول و یا دوم شعاعی به صورت اختیاری قابل تقویت باشند.

۳- مقایسه

چنانچه ساختار ذکر شده را با ساختاری که در آن توری در انتهای فیبر نوری (شکل ۴) قرار گرفته باشد و جفت‌شدگی پرتو با میکرودیسک به طریق انتهایی انجام شود، مقایسه کنیم، موارد زیر قابل ذکر است؛



شکل ۴: نمایش دوبعدی حالت توری-انتها که جفت‌شدگی هر دو مرتبه پراش ۱- و ۱+ را ایجاد می‌کند.

الف- در ساختار توری-انتها به جز مرتبه ۱- پراش، مرتبه ۱+ آن نیز با مدهای شعاعی میکرودیسک جفت می‌شود. در واقع مرتبه ۱- پراش با اولین مد شعاعی جفت شده و مرتبه ۱+ با مدهای مرتبه دوم و سوم شعاعی جفت می‌گردد. همچنین دیگر نمی‌توان زاویه فرودی را صفر در نظر گرفت، بنابراین روند محاسبات از طریق رابطه (۱) پیگیری می‌شود.

ب- در ساختار توری-انتها خود پرتو بعد از پراش از توری با میکرومشدد جفت می‌شود در حالی که در ساختار توری-جانبی میدان‌های ناپایا (evanescent) از طریق توری به داخل میکرودیسک جفت می‌شوند.

ج- در ساختار توری-انتها، انعکاس پرتو توسط توری، باعث برانگیختگی مدهای دیگر شده و در نتیجه غیر قابل کنترل بودن آنها را محتمل می‌سازد، در حالی که در ساختار توری-جانبی این انعکاس اساسا وجود ندارد و به همین دلیل مدهای قابل کنترل می‌توانند به داخل میکرودیسک جفت شوند.

د- از آنجا که در ساختار توری-جانبی با میدان‌های ناپایا سروکار داریم، با توجه به ضعیف بودن و مستهلک شدن آنها در راستای z، دقت و حساسیت حسگری‌های متعدد، بسیار بیشتر از ساختار توری-انتها خواهد بود که در آن از خود پرتو جفت‌شده به میکرودیسک برای حسگری استفاده می‌شود.

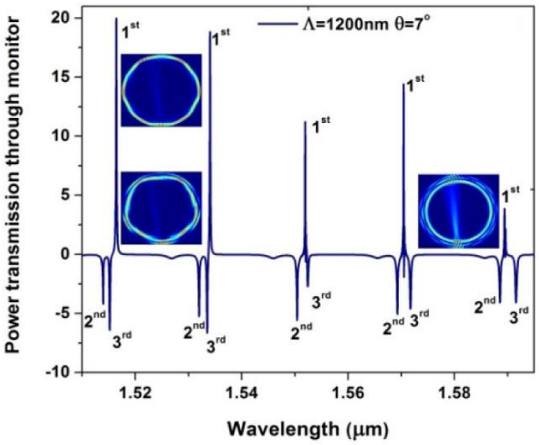
۳-۱- مقایسه نتایج

همان طور که اشاره شد، در حالت توری-انتها سه مد شعاعی تحریک می‌شود، از این رو نمودار توان بر حسب طول موج (شکل۵) دارای سه پیک می‌باشد، که پیک

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01]

مثبت، جفت‌شدگی مرتبه ۱- پراش (برانگیختگی مد اول شعاعی) و پیک‌های منفی، جفت‌شدگی مرتبه ۱+ پراش (برانگیختگی مدهای دوم و سوم شعاعی) را نشان می‌دهد. بدیهی است که به طور کلی در این ساختار ما پیک‌های بزرگتری داشته باشیم، زیرا در این حالت خود نور عبوری از فیبر با برخورد به توری، پراشیده می‌شود، در حالی که در ساختار جفت‌شدگی توری-جانبی میدان ناپایای نشتی، دچار پراش می‌شود.



شکل ۵: توان عبوری از مانیتور بر حسب طول موج در جفت‌شدگی عمودی که با تحریک ۳ مرتبه از مدهای شعاعی همراه است [۷].

اگرچه پیک‌های نمودار توان در جفت‌شدگی توری-انتها نسبت به جفت‌شدگی توری-جانبی بیشتر است، ولی با محاسبه فاکتور کیفیت Q می‌بینیم که Q برای حالت توری-انتها $۱/۷\times۱۰^{۴}$ و برای حالت توری-جانبی $۱/۰۳\times۱۰^{۴}$ است. همچنین با این حال که در ساختار جفت‌شدگی توری-انتها، برای تقویت یک مد خاص، آزادی عمل بیشتری وجود دارد و لحاظ تغییرات زاویه فرودی غیرقابل اجتناب است، در ساختار توری-جانبی زاویه فرودی با تقریب خیلی خوبی صفر در نظر گرفته می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این کار دو ساختار توری-جانبی و توری-انتها به لحاظ کنترل برانگیختگی مدهای خاص مقایسه شدند. علی‌رغم برابری نسبی فاکتور کیفیت در این دو ساختار نشان داده شد که ساختار توری-جانبی اختیار بیشتری برای برانگیختگی مدهای شعاعی جهت بررسی‌های خاص به ما می‌دهد. ضمن اینکه دقت و حساسیت ساختار جانبی به سبب استفاده از جفت‌شدگی میدان‌های ناپایا با میکرودیسک بسیار بهتر است.

مراجع

[1] Farnesi, D., et al., *Long period grating-based fiber coupler to whispering gallery mode resonators.* Optics letters, 2014. **39**(22): p. 6525-6528.

[2] Kreismann, J., S. Sinzinger, and M. Hentschel, *Three-dimensional limaçon: Properties and applications.* Physical Review A, 2017. **95**(1): p. 011801.

[3] Wang, Y., et al., *Tapered optical fiber waveguide coupling to whispering gallery modes of liquid crystal microdroplet for thermal sensing application.* Optics Express, 2017. **25**(2): p. 918-926.

[4] Huet, V., et al ,.*Millisecond photon lifetime in a slow-light microcavity.* Physical review letters, 2016. **116**(13): p. 133902.

[5] Zhou, Y., et al., *Fano resonances in metallic grating coupled whispering gallery mode resonator.* Applied Physics Letters, 2013. **103**(15): p. 15. 1108

[6] Humphrey, M.J., et al., *Calculation of optimal fiber radius and whispering-gallery mode spectra for a fiber-coupled microsphere.* Optics communications, 2007. **271**(1): p. 124-131.

[7] Zhou, Y., et al., *Controlled excitation of higher radial order whispering gallery modes with metallic diffraction grating.* Optics express, 2015. **23**(4): p. 4991-4996.

[8] Bumki M., et al., *High-Q surface-plasmon-polariton whispering-gallery microcavity.* Nature, 2009. **457**(7228): p. 455-458.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01]